干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2018.04.04

近 60 a 内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件特征分析①

薛海丽, 张 钦, 唐海萍
(北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室,北京 100875)

摘 要: 基于相对湿润度指数和非参数百分法,结合线性趋势法、Mann-Kendall 非参数检验法和累积距平检验法,分析了 1955—2015 年内蒙古 4 个草原类型区(多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗)温度和降水,以及极端气候事件变化特征。结果表明:(1) 4 个区域年平均气温均显著升高,升高速率约为 0.40~0.47 ℃·(10 a)$^{-1}$,气温变化存在非对称性升温特征,多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗最低气温上升速率分别为最高气温上升速率的 1.61 倍、1.86 倍、2.73 倍和 1.65 倍,春冬季气温增加速率高于夏秋季。(2) 多伦、海拉尔、四子王旗和锡林浩特年降水量分别为 381.6 mm、350.5 mm、318.6 mm 和 283.6 mm;降水天数显著增加,而降水量无显著变化,但多伦和锡林浩特降水量呈现略微降低的趋势,其它两个区域呈现略微增加的趋势。(3) 4 个区域极端高温事件频率显著增加,突变点均出现在 1990 s,极端低温事件频率显著减少,突变点均出现在 1970s 末。(4) 4 个区域均呈现暖干化的趋势,锡林浩特干旱事件发生最为突出,四子王旗以中度干旱为主,海拉尔和多伦以无旱为主,2000 年后,4 个区域干旱事件发生频率均明显增加。降水量变化不显著,而气温和潜在蒸散量显著升高可能是导致 4 个区域不断干旱化的主要原因。

关 键 词: 气温非对称性;极端高温;极端低温;极端强降水;干旱事件
中图分类号: P467 **文献标识码:** A **文章编号:**

2014 年 IPCC 第五次报告指出,1880—2012 年全球地表平均温度上升约 0.85 ℃(0.65~1.06 ℃),极端天气和气候事件也频繁发生[1],严重威胁人类的生存和社会的可持续发展,引起了国内外学者的广泛关注[2-4]。在全球气候变化的背景下,我国气候也发生了显著变化,成为受气候变化影响最大的国家之一[5],所以了解气候变化尤其是极端气候变化的特征显得十分必要。

目前,国内学者已经开展全国和区域尺度上气候变化特征的研究。1961—2006 年,全国及各气候区平均温度均呈显著上升趋势,增温趋势总体上呈北高南低的分布特征[6],极端最高和极端最低气温均表现为显著上升趋势,极端气温的异常偏冷偏暖现象主要发生在 20 世纪 70 年代后[7]。降水时空变化比较复杂,空间尺度上,降水量变化趋势具有明显的地域性差异[8],时间尺度上,全国平均没有表现出显著增加或减少的长期变化[9]。与降水格局类似,中国极端强降水事件也呈现地域差异,集中度与集中期自西北向东南均呈“低—高—低”的分布特点[10],对于干旱事件,我国不同区域变化趋势各不相同[11]。

以往人们更加关注在全国和区域尺度上气候变化,缺乏在局地尺度气候变化以及极端气候事件的研究。内蒙古草原在欧亚草原中占有重要的地位,是中国北部重要生态安全保障,但由于其气候条件本身的脆弱性和波动性,以及伴随人类活动等复杂的社会因素,成为对全球变化响应敏感的地带[12]。研究内蒙古不同草原类型区极端气温和干旱事件变化特征,可为研究草地生态系统对气候变化的响应提供基础。故本文基于内蒙古典型草原、草甸草原、荒漠草原和位于农牧交错带的典型草原,分析所在区域锡林浩特、海拉尔、四子王旗和多伦1955—

① 收稿日期:2018-01-08; 修订日期:2018-05-15
基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500608-3)
作者简介:薛海丽(1987-),女,山西人,博士,研究方向为全球变化与陆地生态系统. E-mail:201431190026@mail.bnu.edu.cn
通讯作者:唐海萍. E-mail:tanghp@bnu.edu.cn

2015 年气候和极端气候变化特征,为局地尺度气候变化研究和气候变化对草地碳循环过程影响研究提供依据。

1 研究区概况

根据降水量从西到东的增加,可将我国草地类型分为荒漠、草原化荒漠、典型草原和草甸草原[13]。本研究选取多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗为研究区域,具体概况见表 1。

表 1 研究区概况

Tab. 1 Introduction of study areas

区域	经纬度	草地类型	优势物种
多伦	41.75°~42.65°N	典型	羊草(*Leymus chinensis*)
	115.50°~116.92°E	草原	大针茅(*Stipa grandis*)
锡林	43.03°~44.87°N	典型	克氏针茅(*Stipa krylovli*)
浩特	115.30°~117.1°E	草原	冷蒿(*Artemisia frigida*)
海拉	119.47°~120.57°N	草甸	贝尔加针茅(*Stipa baicalensis*)
尔	49.10°~49.47°E	草原	羊草(*Aneurolepidium chinense*)
四子	41.17°~43.37°N	荒漠	短花针茅(*Stipa breviglora*)
王旗	110.33°~113.00°E	草原	沙生针茅(*Stipa glareosa*)
			新疆针茅(*Stipa sareptane*)

2 研究方法

气象数据来源于中国气象局气象数据中心(http://data.cma.cn/),数据源为 1955—2015 年多伦、锡林浩特、呼伦贝尔和四子王旗的日、月和年气象数据。

气候变化趋势采用移动平均和最小二乘法回归分析,回归方程的斜率即为气候倾向率,表征气候变化的趋势和幅度,即

$$y = at + b \tag{1}$$

式中:y 为气温或者降水等气候数据,t 为时间,a 为线性趋势项,b 为常数,$a \times 10$ 为每 10 a 的气候倾向率。

2.1 突变检测

当气候数据存在显著性变化时,采用 Mann-Kendall 检验(M-K 检验)和累积距平的方法进行气候突变点检验,M-K 检验的结果有两条曲线 UF 和 UB,若 UF 值 >0,则表明序列呈上升趋势,<0,则为下降趋势。图中虚线之间为置信区间的范围,若 UF 线超过置信区间,表明上升或下降的趋势显著。置信区间内,UF 与 UB 的交点,就是此方法判定的突变点。为了增强突变点检验结果的可信度,对 M-K 检验得到的可能突变点,再利用逐年累积距平的结果进行验证,该方法已经被证实为一种检验数据系列平均值发生突变的有效工具[14]。

2.2 极端强降水和极端气温确定

本文采用相对阈值中非参数百分法确定极端降水和极端气温阈值,且选用世界气象组织(WMO)推荐的极端气候指数定义不同强度的极端气候事件[15]。具体方法为:年尺度上,将 1955—2015 年年降水量按升序排列的第 95% 的降水量值作为该测站年强降水量的阈值,第 5% 的降水量值作为该测站年弱降水量的阈值。日尺度上,将 1955—2015 年日降水量≥1 mm 按升序排列的第 95% 的降水量值作为该测站极端强降水的阈值,年极端强降水频率指一年中日降水量超过该极端强降水阈值的天数;将 1955—2015 年日最高(低)气温资料按升序排列,取其第 95/5 百分位值作为极端高(低)温事件的上或下阈值,如果某日的最高(低)气温超越或低于该日极端温度事件的上/下阈值,则该日出现了极端高(低)温事件,每年内发生极端气温事件的天数成为极端气温频率。

2.3 干旱等级确定

采用相对湿润度指数确定区域的干旱情况。相对湿润度指数(M)是以自然水分收支平衡为基础的干旱评估指标。它根据降水量和可能蒸散量来反映自然水分主要收入(降水量)与主要支出(蒸散量)的平衡关系,即

$$M = \frac{P - PE}{PE} \tag{2}$$

式中:P 为某时段的降水量(mm);PE 为相同时段的可能潜在蒸散量(mm)。相对湿润度指数值越小,表示干旱强度越大。

PE 的计算采用 Thornthwaite 模型[16],该方法基于美国中东部地区的试验数据而提出,主要以月平均气温为依据。

$$PET_{TH} = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H}\right)^A \tag{3}$$

式中:PET_{TH} 为 Thornthwaite 模型极端的月潜在蒸散量($mm \cdot mon^{-1}$);T_i 为月平均温度(℃);H 为年热量指数;A 为常数。

各月热量指数 H_i 由以下公式计算:

$$H_i = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (4)$$

年热量指数 H 和常数 A 由以下公式计算:

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \quad (5)$$

$$A = 6.75 \times 10^{-7} H^3 - 7.71 \times 10^{-5} H^2 + 1.792 \times 10^{-2} H + 0.49 \quad (6)$$

当月平均气温 $T \leqslant 0$ ℃时,月热量指数 H 视为0,此时潜在蒸散量为0 mm·mon^{-1},该月的干湿情况近似为该月降水量。

本文参考国家标准基于草地生态系统的《气象干旱等级》划分标准(GB/T 20481—2006),该标准中采用 M 指数进行干旱等级划分时只针对月和季尺度,没有定义出年尺度干旱等级的临界值。结合本研究区域气候条件,参考国家标准以及前人的研究[17]对年尺度上相对湿润度指数等级划分进行修正,订正如下:$M > -0.20$ 无旱;$-0.35 < M \leqslant -0.20$ 轻旱;$-0.5 < M \leqslant -0.35$ 中旱;$M \leqslant -0.50$ 重旱或极端干旱,干旱频率即为干旱发生年数。

3 研究结果

3.1 1955—2015年气温和降水量变化

1955—2015年4个区域年平均气温、年均最高气温和年均最低气温均显著增加($P < 0.05$)。四子王旗、锡林浩特、多伦县和海拉尔年平均气温分别为3.6 ℃、2.46 ℃、0.10 ℃和 -1.2 ℃,每10 a增加速率为0.40~0.47 ℃;年均最低气温每10 a增加速率为0.50~0.60 ℃,多伦县最低气温上升速率最快,海拉尔上升最慢;年均最高气温每10 a增加速率范围为0.22~0.31 ℃,海拉尔上升速率最慢,多伦和四子王旗年均最高气温上升速率最慢(表2)。4个区域气温变化皆存在非对称性升温特征:多伦、锡林浩特、海拉尔和四子王旗最低温度上升速率分别为最高温度上升速率的1.61倍、1.86倍、2.73倍和1.65倍。不同季节气温变化也呈现非对称性升温特征,春冬季气温增加速率高于夏秋季。

表2 1955—2015年不同草原类型区气候倾向率季节性变化 / ℃·(10 a)$^{-1}$

Tab.2 Seasonal variation of temperature trend rate in different grassland types in 1955—2015 / ℃·(10 a)$^{-1}$

年代		多伦	锡林浩特	海拉尔	四子王旗
春	年平均气温	0.41	0.46	0.52	0.35
	年均最低气温	0.51	0.61	0.71	0.44
	年均最高气温	0.28	0.32	0.39	0.25
夏	年平均气温	0.27	0.33	0.36	0.29
	年均最低气温	0.24	0.39	0.51	0.39
	年均最高气温	0.27	0.28	0.30	0.26
秋	年平均气温	0.30	0.38	0.31	0.39
	年均最低气温	0.45	0.50	0.46	0.53
	年均最高气温	0.18	0.22	0.17	0.27
冬	年平均气温	0.56	0.29	0.52	0.57
	年均最低气温	0.77	0.58	0.70	0.68
	年均最高气温	0.49	0.39	0.04	0.50
全年	年平均气温	0.47	0.42	0.42	0.40
	年均最低气温	0.50	0.52	0.60	0.51
	年均最高气温	0.31	0.28	0.22	0.31
年平均气温非对称性趋势		1.61	1.86	2.73	1.65

注:均通过 $P < 0.05$ 显著性检验

1955—2015年多伦、海拉尔、四子王旗和锡林浩特平均年降水量分别为381.6 mm、350.5 mm、318.6 mm和283.6 mm,其中锡林浩特降水变异系数最大,为30.6%,多伦县最小,为18.8%,生长季降水量占全年降水量的80.8%~86.5%,说明降水集中在5~9月份(表3)。降水量随时间无显著性变化,但是不同区域表现出差异,其中多伦和锡林浩特以5.9 mm·(10 a)$^{-1}$和5.6 mm·(10 a)$^{-1}$的速率降低,而海拉尔和四子王旗以3.3 mm·(10 a)$^{-1}$和6.6 mm·(10 a)$^{-1}$的速率增加(图1)。四个区域年降水天数约为42~49 d,多伦、海拉尔、四子王旗和锡林浩特的降水天数分别以1.4 d·(10 a)$^{-1}$、3.0 d·(10 a)$^{-1}$、4.7 d·(10 a)$^{-1}$和4.6 d·(10 a)$^{-1}$的速率显著增加($P < 0.01$)。此外,年尺度上,4个区域极端强降水均出现4次,而弱降水出现次数较多:四子王旗、海拉尔、多伦和锡林浩特弱降水频率分别为28、23、20和16次,2000年后弱降水频率开始增加,锡林浩特在该期间内弱降水出现频率占总频率的43%(表3)。

3.2 极端气温事件变化

4个区域极端高温事件出现频率约为18~20 d·a^{-1},均呈现显著增加的趋势($P < 0.05$,图2),突变检验结果见图4,多伦、锡林浩特和海拉尔 UF 线均从1990—1995年开始 >0,表明从该阶段开始,极端高温频率开始显著增加,四子王旗极端高温频率开始显著增加时间较晚,为1995—2000年。此外,在置信区间内 UF 和 UB 曲线均有交点,以四子王旗为例,UF 和 UB 曲线在1997—1998年有交点,

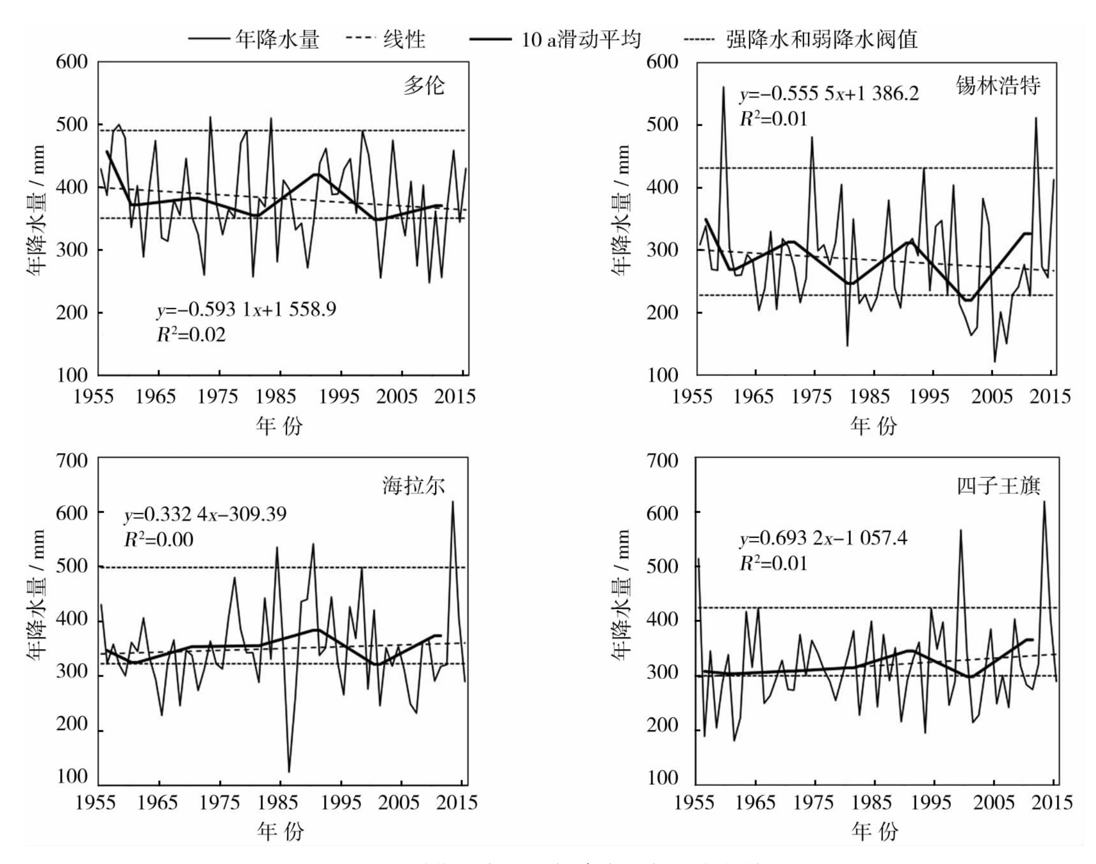


图 1　不同草原类型区年降水量年际变化特征

Fig. 1　Inter-annual variation characteristics of annual total precipitation for different grassland areas

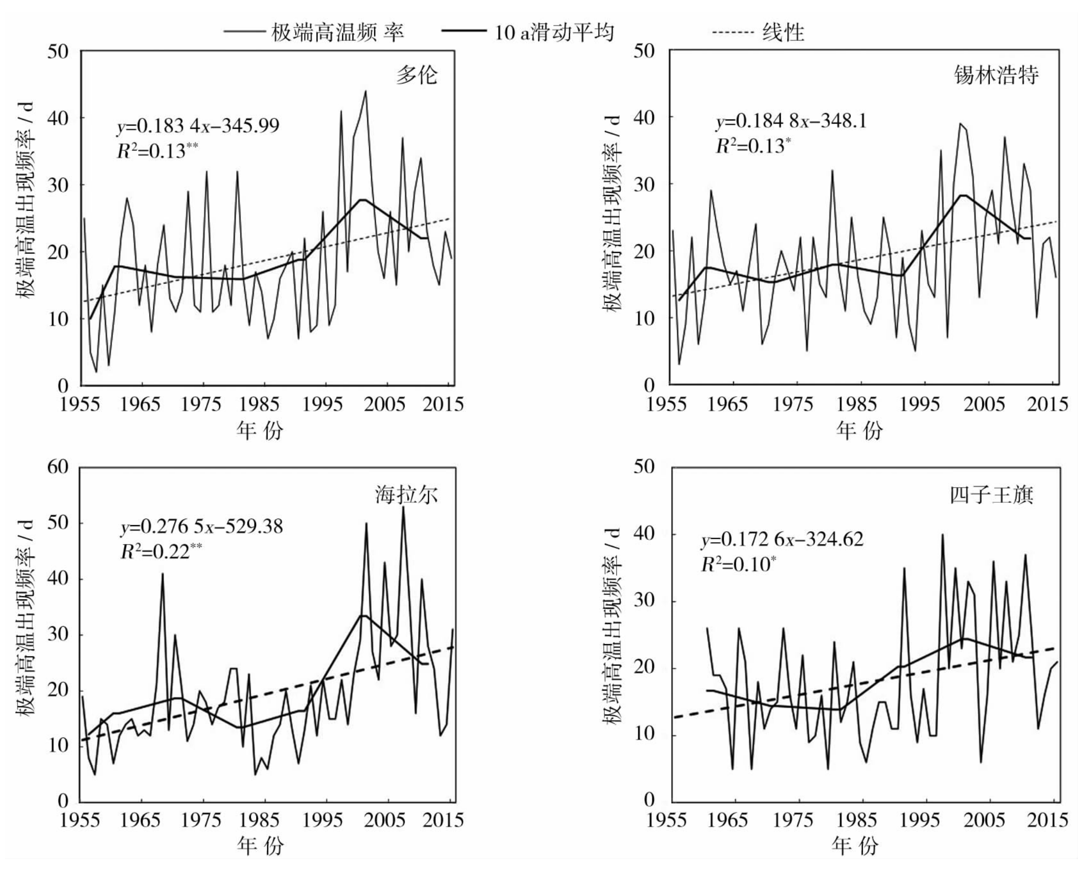


图 2　1955—2015 年不同草原类型区年极端高温频率

Fig. 2　Frequency variation of extreme high temperature of different grassland areas in 1955—2015

表 3　不同草原类型区年降水量和降水天数变化

Tab. 3　Decadal variation of annual total precipitation and precipitation days of different grassland areas

区域	降水量 /mm	生长季所占比例 /%	降水天数倾向率 / d·(10 a)$^{-1}$	降水天数/ d·a^{-1}	弱降水频率	强降水频率
多伦	381.6	86.1	1.4*	49	20	4
锡林浩特	283.6	86.5	3.0*	42	16	4
海拉尔	350.5	85.5	4.7**	49	23	4
四子王旗	318.6	80.8	4.6**	47	28	4

注: * 表示通过 $P<0.05$ 显著性检验, ** 表示通过 $P<0.01$ 显著性检验

该时间段内可能存在极端高温频率变化的突变点;累积距平验证结果表明,四子王旗极端高温频率在 1960—1997 年呈下降趋势,1998—2015 年呈现增加趋势(图 6a)。结合两种方法,可判断四子王旗极端高温频率的突变点出现在 1997—1998 年;同理可判断多伦、锡林浩特、海拉尔极端高温频率突变点出现在 1991—1995 年、1993—1995 年和 1995—1997 年。极端低温事件频率呈显著减少的趋势($P<0.05$,图 3),海拉尔极端低温事件频率最高,约为 27 d·a^{-1},其它三个区域约为 17 ~ 19 d·a^{-1}。突变检验结果见图 5,四个区域 *UF* 和 *UB* 曲线均有交点,其中锡林浩特有两个交点,分别出现在 1963—1994 年和 1972—1973 年,可能为突变点;而累积距平结果表明,该区域极端低温频率在 1955—1971 年呈增加趋势,1986—2015 年呈降低趋势,1972—1985 年呈现波动(图 6b),判断 1972—1985 年可能出现极端低温频率突变点。结合两种方法,可判断锡林浩特极端低温温频率的突变点出现在 1997—1998 年;同理,可判断多伦、海拉尔和四子王旗极端低温频率突变点出现在 1978—1979 年、1979—1980 年和 1978—1979 年,比极端高温频率突变点提前。

3.3　干旱事件变化

1955—2015 年 4 个区域极端强降水事件频率仅为 2.6 ~ 3.3 d·a^{-1},且随时间变化无显著变化($P>0.05$,图 7),年尺度研究结果也表明强降水事件较少,故四个区域以干旱为主。1955—2015 年多

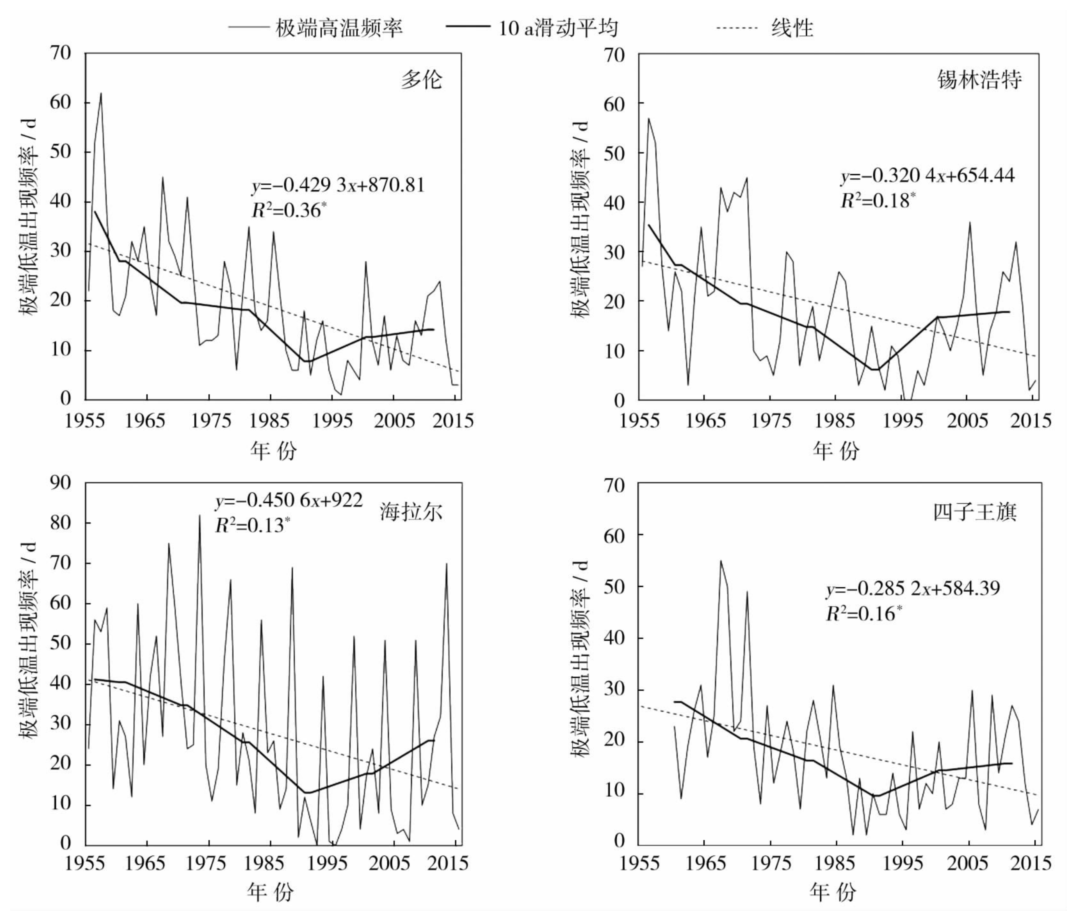


图 3　1955—2015 年不同草原类型区年极端低温出现频率变化

Fig. 3　Frequency variation of extreme low temperature of different grassland areas in 1955—2015

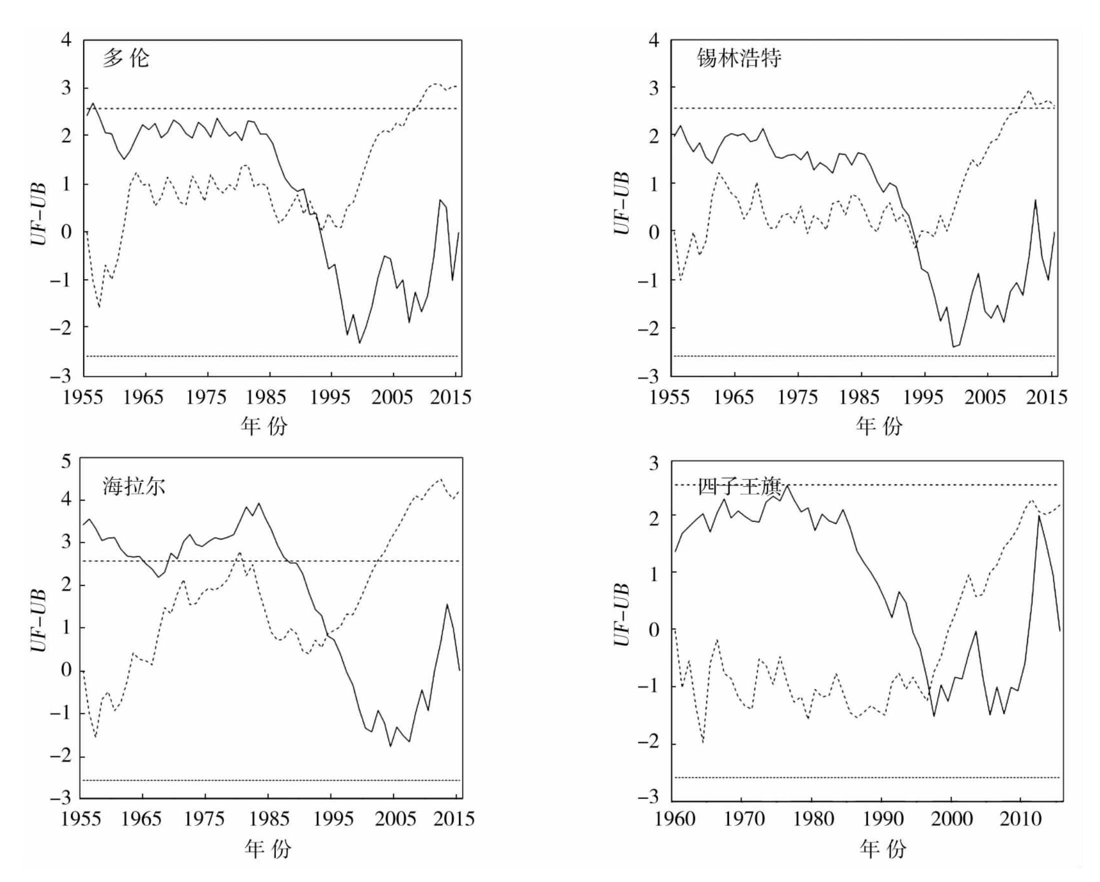


图 4 不同草原类型区年均极端高温频率 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 4 Mann-Kendall test for abrupt change of extreme high temperature frequency of different grassland areas

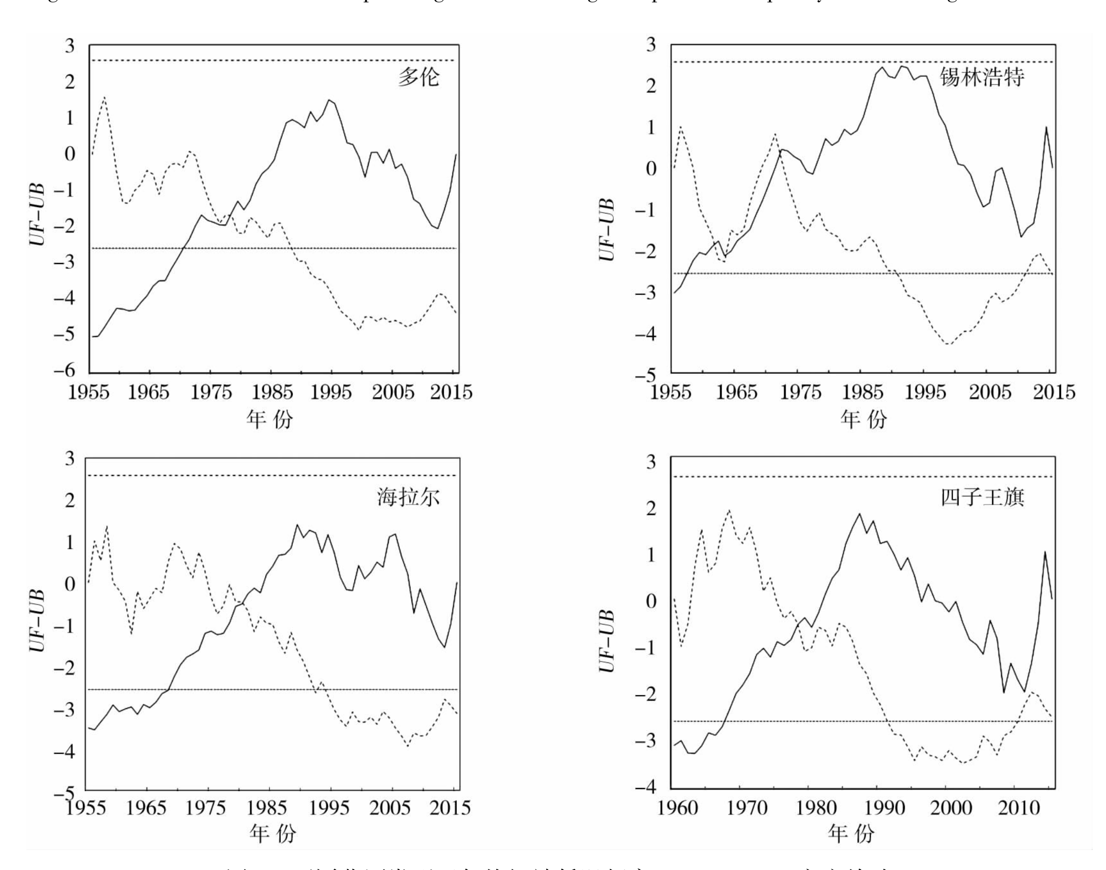


图 5 不同草原类型区年均极端低温频率 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 5 Mann-Kendall test for abrupt change of extreme low temperature frequency of different grassland areas

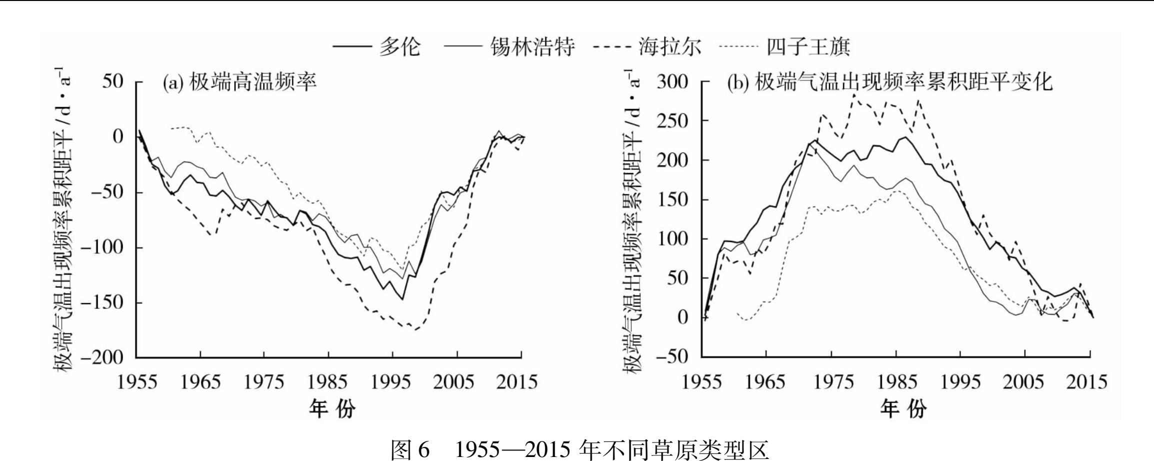


图 6　1955—2015 年不同草原类型区

Fig. 6　Accumulative anomaly curve of extreme temperature of different grassland areas in 1955—2015

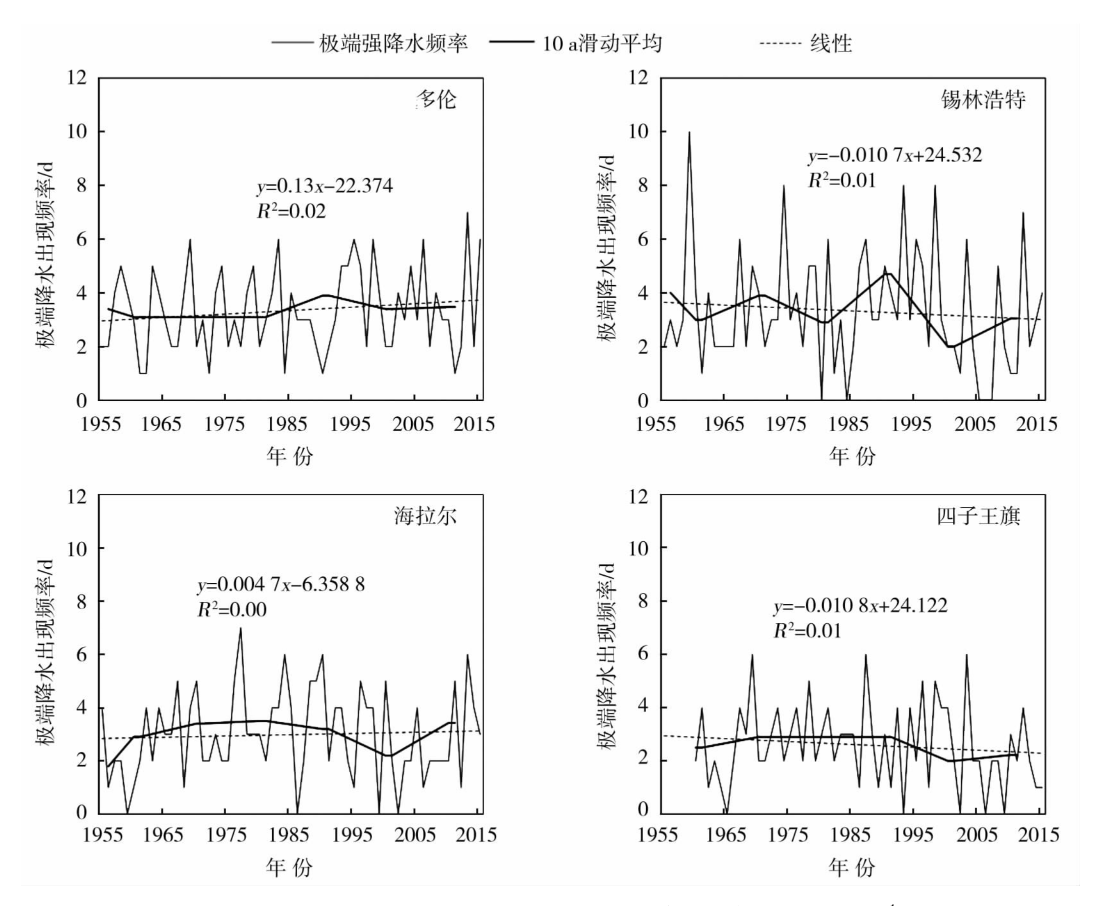


图 7　1955—2015 年不同草原类型区极端强降水频率变化 / d · a⁻¹

Fig. 7　Frequency variation of extreme strong precipitation of different grassland areas in 1955—2015 / d · a⁻¹

伦县、海拉尔、锡林浩特和四子王旗 *M* 值分别为 −0.14、−0.16、−0.39 和 −0.41,且呈现降低的趋势,表明 4 个区域呈现逐渐干旱化的趋势(图 8)。

干旱事件发生最为突出的为锡林浩特,近 60 a 来无旱频率仅为 9 次,极端干旱事件发生 22 次,1980 年以前以中度干旱为主,1980 年后以重度干旱为主;四子王旗以中度干旱为主,总计频率为 19 次,重度干旱发生频率为 8 次;海拉尔和多伦以无旱为主。2000 年后,4 个区域干旱事件发生频率开始增加。

4　讨 论

4.1　非对称性气温变化特征

KARL[18] 分析指出了 1951—1990 年北半球大部分陆地最低气温上升的幅度是最高气温的 3 倍,此后 EASTERLING[19] 证实了气候变暖过程中存在

表 4 1955—2015 不同草原类型区年均干旱和极端干旱发生频率

Tab. 4 Frequency of drought and extreme drought events of different grassland areas in 1955—2015

区域	干旱等级	年代							
		1955—1959	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2010	2010—2015	1955—2015
多伦	无旱	3	7	6	5	9	5	4	39
	轻旱	1	3	3	2	1	2	1	13
	中旱	0	0	1	3	0	2	1	7
	重旱	1	0	0	0	0	1	0	2
锡林浩特	无旱	0	1	2	1	2	1	2	9
	轻旱	2	2	3	1	4	1	0	13
	中旱	2	5	4	2	1	0	3	17
	重旱	1	2	1	6	3	8	1	22
海拉尔	无旱	4	5	7	7	6	3	2	34
	轻旱	0	3	3	1	3	4	4	18
	中旱	1	2	0	1	1	2	0	7
	重旱	0	0	0	1	0	1	0	2
四子王旗	无旱	0	3	2	2	2	3	1	13
	轻旱	0	3	4	4	4	1	1	17
	中旱	0	1	4	4	2	4	4	19
	重旱	1	3	0	0	2	2	0	8

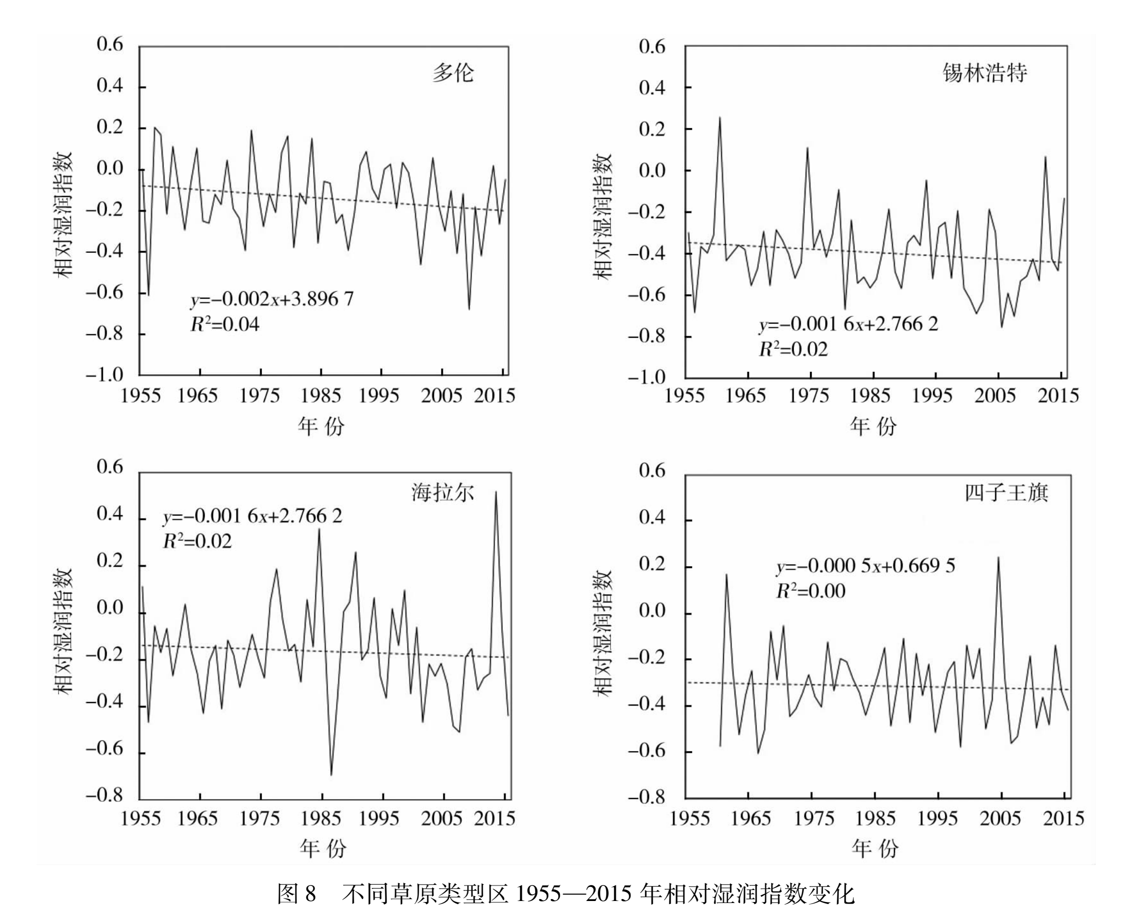


图 8 不同草原类型区 1955—2015 年相对湿润指数变化

Fig. 8 Dynamic change of relative moisture index of different grassland areas in 1955—2015

明显的非对称性。基于我国 603 个气象站 1961—2002 年气温观测资料研究表明,最高和最低气温变化普遍存在不对称现象,日最低气温升幅是日最气高温升幅的 2～3 倍[20]。本研究也表明,四个区域最高和最低气温变化上均存在非对称性升温特征,气温变化的非对称性对生态系统的结构和功能会造成不同程度的影响[21—22],故建议,在今后气候变化对生态系统影响的研究中,考虑温度的非对称性

特征。

4.2 草原区呈现暖干化趋势

本研究表明,四个区域极端高温事件和干旱事件不断增加,表明了四种草原类型区呈现暖干化的变化趋势。我国不同区域极端干旱事件频率变化趋势各不相同,东北、华北和西南地区极端干旱频率显著增加[23],也有区域极端干旱事件减少,如 1960—2009 年石羊河流域极端干旱事件频率在波动中呈减少趋势[24]。此外,四个区域干旱事件也表现出地域差异,锡林浩特极端干旱事件最为突出,四子王旗以中度干旱为主,且 2000 年后,干旱事件发生频率明显增加,海拉尔和多伦虽然极端干旱发生频率相对较低,但是 2000 年后干旱事件发生频率也开始增加。

气候干旱化是一个复杂的问题,与日照时数、平均风速和平均气温等气候因子以及它们之间复杂的相互作用有关[25],而本质上干旱是由于降水和水分蒸散的收支不平衡而造成的异常短缺现象。空间尺度上,锡林浩特干旱化最严重,主要是由于其较少的降水量和较高的潜在蒸散量(表 5)。时间尺度上,四个区域干旱事件频率均增加,一方面四个区域降水量随时间变化无显著性变化,而潜在蒸散量却呈现显著增加的趋势,另一方面,气温和极端高温事件的显著增加,必定会加速生态系统水分的蒸散。故潜在蒸散量和极端高温事件的显著增加共同导致四个区域的不断干旱化。

表 5 不同草原类型区降水量和潜在蒸散量

Tab. 5 Precipitation and potential evapotranspiration in different grassland types in 1955—2015 years

区域	潜在蒸散量/mm	潜在蒸散量回归方程	R^2	P
多伦	438.1	$y=0.6426x+414.7$	0.50	$P<0.01$
锡林浩特	466.3	$y=0.8888x-1298.5$	0.57	$P<0.01$
海拉尔	417.7	$y=0.9672x+387.25$	0.60	$P<0.01$
四子王旗	457.3	$y=0.7132x-959.72$	0.51	$P<0.01$

内蒙古是干旱半干旱生态系统分布较集中和全球变化最为敏感的区域之一,本研究表明该区域四种草地类型所在区域均呈现暖干化,极端高温和干旱事件也不断增加,可能会使生态系统结构和组成产生巨大甚至不可逆转的影响,导致草地生态系统沙化和退化[26-27]。极端事件的增加也会影响生态系统功能,基于该区域的研究表明,极端高温会显著抑制植被的生长[28],且干旱事件导致荒漠草原、典型草原和草甸草原 *NPP* 降低 20.5%、17.5% 和 13.1%[29];极端干旱事件也会降低草地生态系统的碳累积和碳汇功能,导致生态系统从碳汇转变为碳源[30]。总之,极端气候事件的增加会导致草地生态环境的恶化,严重影响人类生活,研究局地尺度上极端气候事件特征,可为研究极端气候变化对生态系统的影响和应对极端气候事件提供基础。

5 结 论

1955—2015 年研究区域年平均气温以 0.40 ~ 0.47℃·(10a)$^{-1}$的速率显著增加,且气温变化存在非对称性升温特征;四个区域降水天数均显著增加,而降水量随时间无显著性变化,但是变化趋势存在差异;极端高温事件约为 18 ~ 20 d·a^{-1},呈现显著增加趋势,而极端低温事件频率显著减少,海拉尔极端低温事件频率约为 27 d·a^{-1},其它 3 个区域约为 17 ~ 19 d·a^{-1};4 个区域极端强降水事件较少,干旱事件较多,其中锡林浩特极端干旱事件发生最为突出。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate change 2014 synthesis report[R]. 2014.

[2] SMITH M D. The ecological role of climate extremes: Current understanding and future prospects[J]. Journal of Ecology, 2011, 99: 651-655.

[3] DAI G. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52-58.

[4] 赵雪雁,王亚茹,张钦,等. 近 50 a 青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征[J]. 干旱区地理, 2015, 38(4): 675-683. [ZHAO Xueyan, WANG Yaru, ZHANG Qin, et al. Climatic characteristics of heavy precipitation events during summer half year over the eastern Tibetan Plateau in recent 50 years[J]. Arid Land Geography, 2015, 38(4): 675-683.]

[5] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2011. [The Compilation Group of the Second National Assessment Report of Climate Change. Second national assessment report on climate change[M]. Beijing: Science Press, 2011.]

[6] 尹云鹤,吴绍洪,陈刚. 1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, (12): 2147-2157. [YIN Yunhe, WU Shaohong, CHEN Gang. Regional difference of climate trend and abrupt climate change in China during 1961—2006[J]. Journal of Natural Resources, 2009(12): 2147-2157.]

[7] 赵军,师银芳,王大为,等. 1961—2008 年中国大陆极端气温时

空变化分析[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(3):52－56. [ZHAO Jun, SHI Yinfang, WANG Dawei, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperatures in China during 1961—2008[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(3):52－56.]

[8] 任国玉,战云健,任玉玉,等. 中国大陆降水时空变异规律:I 气候学特征[J]. 水科学进展, 2015,26(3):299－310. [REN Guoyu,ZHAN Yunjian,REN Yuyu,et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China:I Climatology[J]. Advances in Water Science,2015,26(3):299－310.]

[9] 任国玉,柳艳菊,孙秀宝,等. 中国大陆降水时空变异规律: III 趋势变化原因[J]. 水科学进展, 2016,(3):1－23＋25. [REN Guoyu,LIU Yanju,SUN Xiubao,et al. Spatial and temporal patterns of precipitation variability over mainland China:III Causes for recent trends[J]. Advances in Water Science,2016,(3):1－23＋25.]

[10] 杨金虎,李耀辉,王鹏祥,等. 中国极端强降水事件年内非均匀性特征分析[J]. 自然资源学报,2007,22(4):623－633. [YANG Jinhu, LI Yaohui, WANG Pengxiang, et al. Analyses on intra-annual inhomogeneity characteristic of extreme strong precipitation events in China[J]. Journal of Natural Resources,2007,22(4):623－633.]

[11] 郑景云,郝志新,方修琦,等. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展,2014,33(1):3－12. [ZHANG Jingyun, HAO Zhixin, FANG Xiuqi, et al. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geography,2014,33(1):3－12.]

[12] 李青丰. 气候变化与内蒙古草地退化初探[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(4): 98－102. [LI Qingfeng. A primary analysis on climatic change and grassland degradation in Inner Mongolia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2002,20(4): 98－102.]

[13] 韩兴国,李凌浩. 内蒙古草地生态系统维持机理[M]. 北京:中国农业大学出版社, 2012. [HAN Xingguo,LI Linghao. Maintenance mechanism of grassland ecosystem in Inner Mongolia[M]. Beijing: Chinese Agricultural University press,2012.]

[14] 王志杰,李畅游,贾克力,等. 呼伦湖水面蒸发量计算及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境. 2012,26(3):88－95. [WANG Zhijie,LI Changyou,JIA Keli,et al. Caculation and characteristics of Hulun Lake surface evaporation[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2012,26(3): 88－95.]

[15] KLEIN TANK A M G,ZWIERS F W,ZHANG X B,et al. Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation[R]. World Meteorological Organization (WMO),2009,WCDMP-No. 72. WMO-TD No. 1500.

[16] THRNTHWAITE C W. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geographical Review,1948,38(1): 55－94.

[17] 王明田,王翔,黄晚华,等. 基于相对湿润度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征[J]. 农业工程学报,2012,28(19):85－92. [WANG Mingtian,WANG Xiang,HUANG Wanhua,et al. Temporal and spatial distribution of seasonal drought in southwest of China based on relative moisture index[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(19):85－92.]

[18] KARL T R,DIAZ H F,KUKLA G. A new perspective on recent global warming: Asymmetric trends of daily maximum and minimum temperature[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1993,74:1007－1023.

[19] EASTERLING D R,HORTON B,JONES P D,et al. Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. Science,1997,277:364－367.

[20] 唐国利,丁一汇. 由最高最低气温求算的平均气温对我国年平均气温序列影响[J]. 应用气象学报,2007,18(2): 187－192. [TANG Guoli,DING Yihui. Impacts of the average air temperature derived from maximum and minimum temperatures on annual mean air temperatures series of China[J]. Journal of Applied Meteorological Science,2007,18(2):187－192.]

[21] XIA J,HAN Y,ZHANG Z,et al. Effects of diurnal warming on soil respiration are not equal to the summed effects of day and night warming in a temperate steppe[J]. Biogeosciences,2009,6:1361－1370

[22] SU H X,FENG J C,AXMACHER J C,et al. Asymmetric warming significantly affects net primary production,but not ecosystem carbon balances of forest and grassland ecosystems in northern China[J]. Scientific Reports,2015,5:9115.

[23] 马柱国,华丽娟,任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律[J]. 地理学报,2003,58(z1):69－74. [MA Zhuguo,HUA Lijuan,REN Xiaobo. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years[J]. Acta Geographica Sinica,2003,58(z1):69－74.]

[24] 张勃,张耀宗,任培贵,等. 基于 SPEI 法的陇东地区近 50a 干旱化时空特征分析[J]. 地理科学,2015, 35(8):999－1006. [ZHANG Bo, ZHANG Yaozong, REN Peigui, et al. Analysis of drought spatial-temporal characteristics based on SPEI in eastern region of Gansu in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica. 2015,35(8):999－1006.]

[25] 刘文莉,张明军,王圣杰,等. 近 50 年来华北平原极端干旱事件的时空变化特征[J]. 水土保持通报,2013,33(4):90－95. [LIU Wenli, ZHANG Mingjun,WANG Shengjie,et al. Temporal-spatial variation characteristics of extreme drought event in North China Plain during recent 50 years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2013,33(4):90－95.]

[26] 张彬,朱建军,刘华民,等. 极端降水和极端干旱事件对草原生态系统的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(9):1008－1018. [ZHANG Bin,ZHU Jianjun,LIU Huamin,et al. Effects of extreme rainfall and drought events on grassland ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2014,38(9):1008－1018.]

[27] EASTERLING D R,EVANS J L,GROISMMAN P Ya,et al. Observed variability and trends in extreme climate events: Abrief review[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2000,81

(3):417 – 425.

[28] 张存厚,王明玖,乌兰巴特尔,等. 内蒙古典型草原地上净初级生产力对气候变化响应的模拟[J]. 西北植物学报,2012,32(6):1229 – 1237. [ZHANG Cunhou, WANG Mingjiu, WULANBATER, et al. Responses of ANPP to climate change in Inner Mongolia typical steppe-asimulation study[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2012,32(6):1229 – 1237.]

[29] LEI Tianjie, WU Jianjun, WANG Qianfeng, et al. A new framework for evaluating the impacts of drought on net primary productivity of grassland[J]. Science of the Total Environment,2015,536:161 – 172.

[30] ZHAN L, GUO H D, JIA G S, et al. Net ecosystem productivity of temperate grasslands in northern China: An upscaling study[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2014,184:71 – 81.

Extreme temperature and drought events in four different grassland areas of Inner Mongoliain in recent 60 years

XUE Hai-li, ZHANG Qin, TANG Hai-ping

(*State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*)

Abstract: The grassland in Inner Mongolia is an important ecological security guarantee in northern China, the ecological environment in the area is extremely sensitive to climate change. Studying the characteristics of extreme climate events of the area can promote the understanding of the response of grassland to climate change. Based on the relative humidity index and nonparametric percentile method, combined with linear trend method, Mann – Kendall mutation and cumulative anomaly test, we analyzed the characteristics of the change in temperature, precipitation, and the extreme climate events in four different grassland areas in Inner Mongolia (Dolun, Xilinhot, Hailar and Siziwang Banner) from 1955 to 2015. The results indicated as follows: (1) The annual average temperatures of the four regions were significantly increased at a rate of 0.40 – 0.47 ℃ · $(10\ a)^{-1}$, and presented asymmetric trend, the rising rate of minimum temperature in Duolun, Xilinhot, Hailar and Siziwang Banner were 1.61, 1.86, 2.73 and 1.65 times higher than those in correspondenceof the maximum temperature, respectively, and the rising rates in spring and winter were higher than those in summer and autumn. (2) The annual total precipitation in Duolun, Hailar, Siziwang Banner and Xilinhot were 381.6 mm, 350.5 mm, 318.6 mm and 283.6 mm, respectively. Although the number of precipitation days was increased significantly, the precipitation in Dolun and Xilinhot was slightly decreased, while it was slightly increased in the other two regions. (3) The frequency of extreme high temperature events was increased significantly, while the extreme cold events was decreased significantly. (4) In the past 60 years, the climate in the four regions has been warming and drying, among which the extreme drought events in Xilinho thad the highest frequency while Siziwang Banner was dominated by moderate drought. After 2000, the frequency of drought events in the four regions was increased significantly, this may be due to the significant increase in temperature and potential evapotranspiration, while the precipitation did not change significantly.

Key words: asymmetric trends; extreme high temperature; extreme low temperature; extreme strong precipitation; drought events